

## 2 Revisão bibliográfica

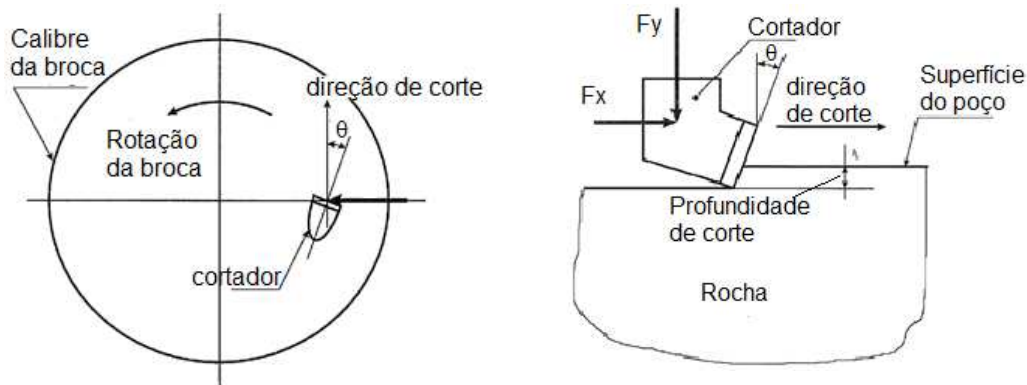
Neste capítulo são abordados alguns dos trabalhos experimentais e numéricos sobre ensaios de corte em rocha. Com isso, pretende-se descrever o problema a ser modelado e observar o estado da arte da aplicação da modelagem com o método dos elementos finitos para a análise do problema de corte em rocha.

### 2.1. Cortadores das brocas PDC e o conceito da energia específica mecânica.

Conforme Thomas (2001), ao final da década de 1970 foram lançadas as brocas PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*) denominadas assim porque utilizam diamantes sintéticos. Sua estrutura de corte é formada por pastilhas ou compactos montados sobre bases cilíndricas, instalada no corpo da broca. A Figura 2.1 mostra um exemplo de broca PDC, onde os cortadores são representados na seção dourada e as vias de fluxo do fluido de perfuração são mostradas em cor azul. Os cortadores estão fixos e a rocha é removida quando os cortadores são arrastados através de uma trajetória circular pela rotação da broca no fundo do poço. A Figura 2.2 mostra um esboço da trajetória circular percorrida por um cortador e uma vista vertical do processo de corte. O ângulo ( $\theta$ ) representa o ângulo de ataque, ou seja, a inclinação do cortador em relação à superfície da rocha a ser cortada.



Figura 2.1 – Exemplo de uma broca PDC de 8 ½” de diâmetro. (Hareland *et al*, 2007).



*Trajetória circular do cortador único.*

*Vista vertical do processo de corte.*

Figura 2.2 – Esboço da trajetória circular de um cortador e uma vista vertical do processo de corte. (Modificado de Hareland *et al.*, 2009).

Os ensaios experimentais de corte em rocha podem ser de dois tipos: estudos de campo que usam brocas completas e estudos de laboratório que usam um único cortador para reproduzir o processo de corte. Os ensaios de laboratório com cortador único (*single cutter*) têm sido amplamente estudados desde o ponto de vista analítico e numérico. Esta dissertação faz ênfase no ensaio com cortador único.

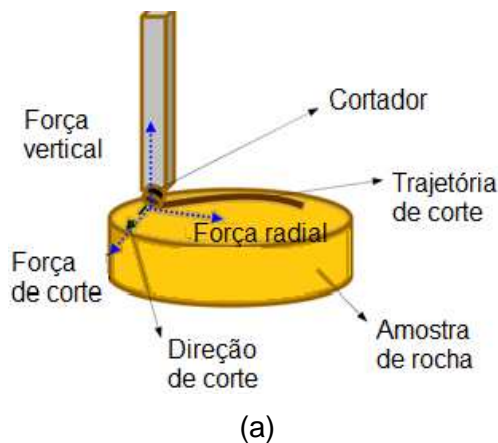
Os ensaios de cortador único permitem reproduzir a ação individual dos cortadores das brocas PDC. Este ensaio de escala reduzida permite determinar as forças de penetração e arraste agindo em cada cortador localizado na face da broca e estimar os principais parâmetros que afetam a eficiência do processo de

corte (Glowka,1989). Na seção seguinte este ensaio será explicado mais detalhadamente.

## 2.2.

### Abordagem experimental do processo de corte em rocha

Poucos equipamentos foram desenvolvidos para ensaios de cortadores únicos, como os descritos por Rafatian *et al* (2009) e Kaitkay & Lei (2004). Como exemplo deste tipo de ensaio, pode-se descrever o funcionamento do equipamento da Universidade de Tulsa (Rafatian *et al*, 2009). Neste equipamento um cortador único está suportado por uma haste e é instalado com o ângulo de corte desejado. Uma amostra de rocha é colocada num suporte dentro de uma célula de alta pressão. A rocha é pressurizada até a pressão desejada e um disco com velocidade de rotação variável movimentada a amostra de rocha dentro da célula de pressão. A rocha gira à velocidade e pressão estabelecidas, e simultaneamente o sistema que contém o cortador desce até penetrar a rocha, produzindo o corte de profundidade constante numa volta. Enquanto o cortador está cortando a amostra de rocha, as forças exercidas no cortador são medidas em três direções através de um conjunto de *strain gauges* localizados acima do cortador. A Figura 2.3 mostra um diagrama das forças medidas no ensaio e amostras de rocha depois de submetidas a este tipo de ensaio.



Amostras de mármore e calcário depois do ensaio de cortador único.

Figura 2.3 – Ensaio de corte com um cortador único: (a) Forças no cortador e (b) amostras de rocha submetidas ao ensaio de cortador único. (Modificado de Rafatian *et al*, 2009).

### 2.2.1. Resultados experimentais e formulações analíticas do processo de corte em rocha com cortador único

A energia necessária para cortar a rocha depende do estado de desgaste do cortador, da profundidade do corte e da pressão de confinamento. Em seguida são apresentados resultados obtidos experimentalmente e que representam a influencia da variação destes três parâmetros sobre as forças de corte.

**Profundidade do corte.** A profundidade do corte é uma das principais causas da mudança no modo de falha das rochas submetidas no processo de corte. As observações experimentais de Richard (1998) concluíram que o modo de falha dúctil ocorre em profundidades rasas de corte (geralmente menores que 1mm) e caracteriza-se pelo esmagamento e acumulação do material na frente do cortador e que, para profundidades maiores, as rochas podem apresentar um modo de falha frágil caracterizado por grandes fissuras que iniciam na ponta do cortador e formam várias trajetórias irregulares na frente do cortador. A Figura 2.4 mostra a diferença do modo de falha para diferentes profundidades.



*Modo de falha dúctil.*

*Profundidade rasa de corte.*



*Modo de falha frágil.*

*Profundidade maior de corte.*

Figura 2.4 – Modos de falha para diferentes profundidades de corte. (Richard, 1998).

Segundo Richard *et al.* (1998), no modo de falha dúctil a força de corte é proporcional à área da seção transversal de corte, enquanto que para o modo de falha frágil a força média pode ser proporcional à raiz quadrada da profundidade de corte. No modo de falha frágil a energia necessária para iniciar tal fratura está relacionada com a superfície da fissura e não com o volume de rocha removido

como no modo dúctil. Esta interpretação conceitual explica que a transição entre os modos de corte apresenta-se numa profundidade crítica (com relação a rocha) onde os *chips* (blocos de rocha cortada) aparecem. Essa profundidade crítica é definida pela Equação (2.1):

$$d^* \sim \left( \frac{K_{IC}}{q} \right)^2 \quad (2.1)$$

Onde:

$d^*$  : Profundidade crítica de transição de modo dúctil para frágil.

$K_{IC}$  : Tenacidade da rocha

$q$  : Resistência à compressão.

A Equação (2.1) define que o modo de falha frágil (aparição de *chips*) acontece em pequenas profundidades de corte para rochas altamente resistentes.

Geralmente os ensaios com cortadores únicos são realizados em profundidades rasas em relação ao cortador e a rocha indicando que o modo de corte seja do tipo dúctil.

Zhang *et al.* (2011) apresentaram resultados experimentais que permitem observar que a energia específica mecânica tende a diminuir quando a profundidade de corte aumenta. Foi demonstrado que a tendência é similar tanto para ensaios com cortador único quanto para experimentos feitos com uma broca completa (Figura 2.5).

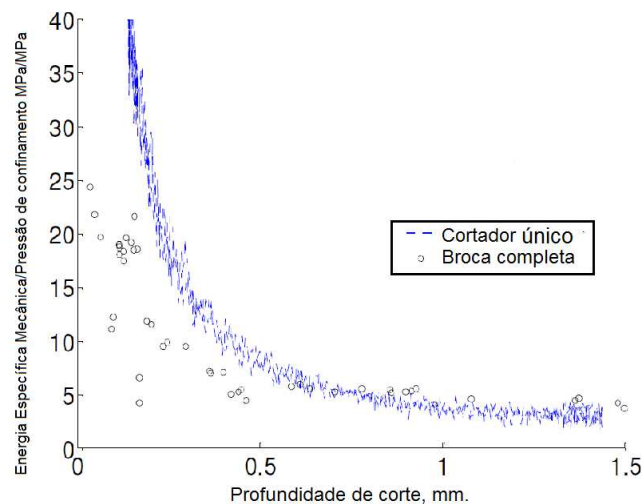


Figura 2.5 – Variação da energia específica mecânica com a profundidade de corte (Modificado de Zhang *et al.*, 2011).

**Desgaste do cortador.** O desenvolvimento progressivo de uma superfície de desgaste no cortador é muito frequente. A representação esquemática das forças agindo em um cortador perfeitamente afiado e em outro com superfície de desgaste é mostrado na Figura 2.6.

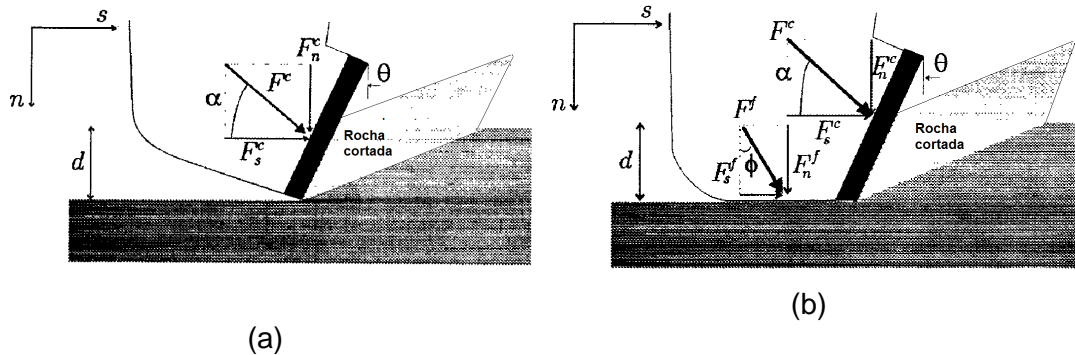


Figura 2.6 – Esquema de forças para (a) um cortador perfeitamente afiado e (b) para um cortador com superfície de desgaste (Detournay & Defournay, 1992).

A superfície de desgaste está em contato com a rocha produzindo forças de atrito que incrementam as forças de corte. O efeito da superfície de desgaste pode ser quantificado através do modelo analítico introduzido por Detournay & Defournay (1992) que está baseado nas seguintes premissas:

- As forças de corte (Equação 2.2 e 2.3) são geradas de forma desacoplada com as forças de contato (Equação 2.5).
- As forças de corte são proporcionais à área da seção transversal de corte e estão definidas de acordo com as Equações (2.2) e (2.3).

$$F_s^c = \varepsilon A = \varepsilon w d \quad (2.2)$$

$$F_n^c = \zeta \varepsilon A = \zeta \varepsilon w d \quad (2.3)$$

Onde,

$F_s^c$  : Componente tangencial da força de corte.

$F_n^c$  : Componente normal da força de corte.

$\varepsilon$  : Energia específica intrínseca

$A$  : Área do cortador

$w$  : Largura do cortador

$d$  : Profundidade de corte

$\zeta$  : Razão entre a força normal e a força tangencial agindo na face do cortador.

A razão  $\zeta$ , definida pela Equação 2.4, caracteriza a inclinação ( $\theta$ ) da face do cortador com respeito à direção do movimento de corte.

$$\zeta = \tan (\theta) \quad (2.4)$$

A energia específica intrínseca é a energia usada estritamente no corte da rocha sem levar em conta a dissipação de energia associada com superfícies de desgaste que produzem forças de atrito.

- c) As componentes vertical e horizontal da força exercida sobre a superfície de desgaste estão relacionadas de acordo com a lei de atrito da Equação (2.5).

$$F_s^f = \mu F_n^f \quad (2.5)$$

Onde:

$F_s^f$  : Componente tangencial da força de atrito.

$F_n^f$  : Componente normal da força de atrito.

$\mu$  : Coeficiente de atrito que pode ser expresso como a Equação (2.6) em função do ângulo de atrito interno da rocha ( $\varphi$ ).

$$\mu = \tan (\varphi) \quad (2.6)$$

Ao somar as forças na face do cortador e na superfície de desgaste das Equações (2.2), (2.3) e (2.5), a relação linear da Equação (2.7) é obtida.

$$MSE = E_0 + \mu S \quad (2.7)$$

Onde:

$MSE$  : Energia específica total, definida pela Equação (2.8)

$S$  : Resistência à perfuração, definida pela Equação (2.9)

$MSE_0$  : Constante definida pela Equação (2.10)

$$MSE = \frac{F_s^c + F_s^f}{A} = \frac{F_s}{A} \quad (2.8)$$

$$S = \frac{F_n^c + F_n^f}{A} = \frac{F_n}{A} \quad (2.9)$$

$$MSE_0 = (1 - \mu \zeta) \varepsilon \quad (2.10)$$

O diagrama MSE-S de energia específica total (MSE) versus a resistência à perfuração (S) (Figura 2.7) permite definir a existência de desgaste no cortador. Se o cortador está perfeitamente afiado, o estado do corte é representado por um ponto, denominado “ponto de corte”. Neste ponto a força sobre o cortador é proporcional à área da seção transversal de corte, ou à

profundidade de corte para um cortador retangular. Este “ponto de corte” está definido pelas coordenadas representadas nas Equações (2.11) e (2.12).

$$MSE = \varepsilon \quad (2.11)$$

$$S = \zeta \varepsilon \quad (2.12)$$

A resposta de um cortador desgastado está representada pela linha de atrito, definida pela pendente  $\mu$  (Figura 2.7). O desgaste de um cortador está relacionado com o aumento da energia específica  $e$ , consequentemente, com a perda e eficiência do corte ( $\eta$ ), definida pela equação (2.13).

$$\eta = \frac{\varepsilon}{MSE} \quad (2.13)$$

Quando a eficiência do corte decresce, o ponto que representa a resposta do cortador se movimenta para o lado direito do “ponto de corte”. A eficiência do corte depende do tamanho da superfície de desgaste e da profundidade de corte. Em certa profundidade, a eficiência decresce quando o tamanho da superfície de desgaste é incrementado. Para um determinado tamanho da superfície de desgaste, a eficiência diminui quando a profundidade é reduzida. A influência do tamanho da superfície de desgaste e da profundidade é ilustrada na Figura 2.7, que mostra os resultados experimentais obtidos por Adachi *et al.* (1996) de ensaios de corte em arenito. Observa-se que o estado de corte do cortador afiado define o ponto de corte 100% eficiente.

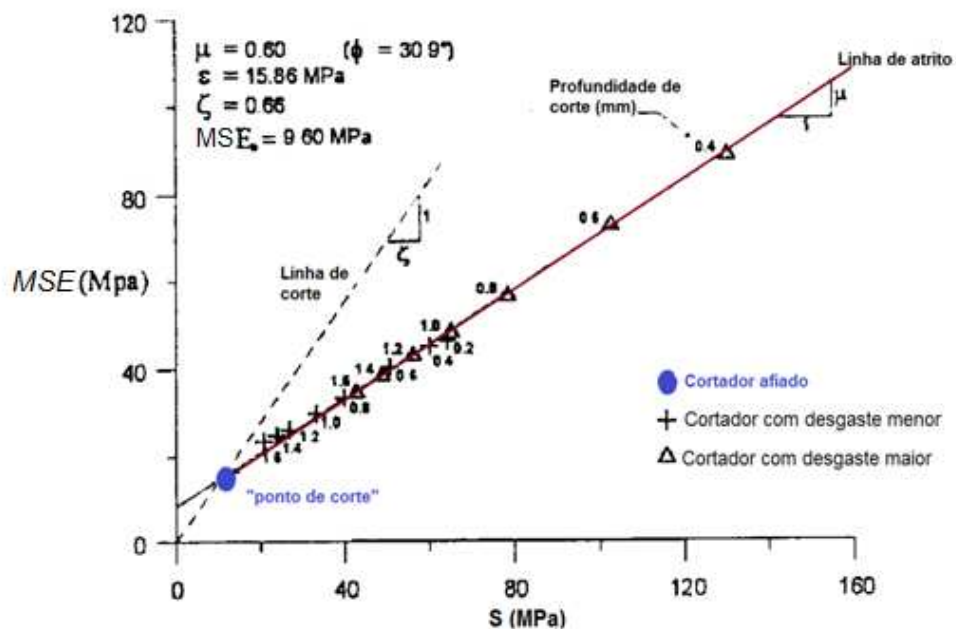


Figura 2.7 – Diagrama MSE-S para um arenito. (Adachi *et al.*, 1996).



Em resumo, o desenvolvimento de uma superfície de desgaste no cortador pode ser observado através do diagrama MSE-S, uma vez que o desgaste faz com que o ponto que representa o estado do corte se movimente sobre a linha de atrito afastando-se do “ponto de corte” idealmente eficiente. Segundo Richard *et al.* (1998), para cortadores inclinados um ângulo  $\theta=15^\circ$  o efeito do desgaste chega a ser significativo se a razão S/E é maior do que 0.9.

Os modelos desenvolvidos nesta dissertação apresentam somente modelos de cortadores perfeitamente afiados. Conseqüentemente foram aplicadas as Equações (2.8) e (2.9) omitindo as componentes da força de atrito ( $F_n^f$  e  $F_s^f$ ), para avaliar a energia específica intrínseca e a resistência à perfuração sob o efeito da variação da profundidade de corte.

Por essa razão os resultados esperados devem ser similares aos da Figura 2.8, que apresenta a variação das forças horizontais e verticais com a variação da profundidade para ensaios realizados com um cortador afiado em um Arenito Red Wildmoor. (Richard *et al.*, 1998).

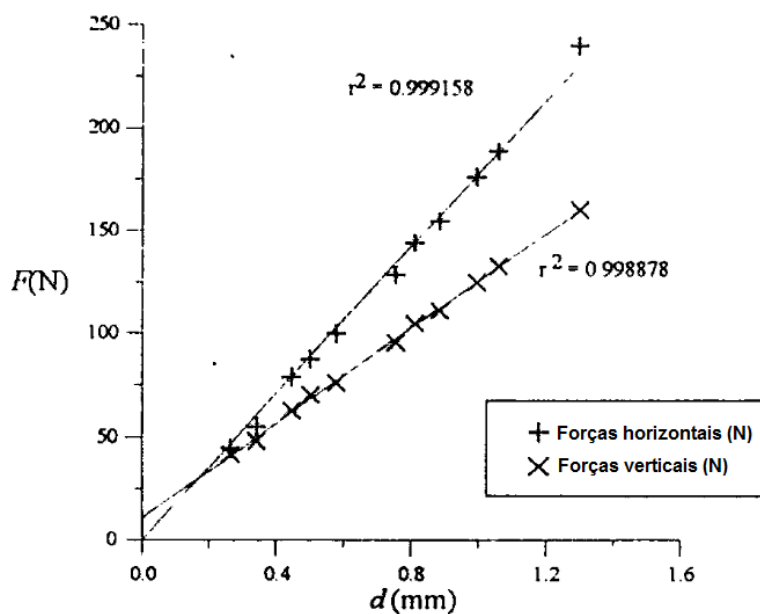


Figura 2.8 – Relação linear entre as forças e a profundidade de corte. Ensaio realizado com um cortador afiado em um Arenito Red Wildmoor. (Richard *et al.*, 1998).

**Pressão de confinamento.** Os ensaios desenvolvidos por Rafatian *et al.* (2009) e Kaitkay & Lei (2005) apresentam uma importante contribuição para o estudo do comportamento das rochas submetidas a processos de corte em diferentes condições de pressão confinante. Estes trabalhos foram feitos sobre

mármore de Cartago, obtendo similares comportamentos das forças registradas no cortador, mas com magnitudes que não podem ser comparadas porque os experimentos foram realizados para diferentes pressões de confinamento e diferentes condições geométricas (ângulo do cortador, profundidade de corte, geometria do cortador).

A Figura 2.9 mostra um significativo incremento na força da ferramenta quando é aplicada uma pressão de confinamento durante o processo de corte. Além disso, uma maior frequência na oscilação da magnitude da força se apresenta na presença de confinamento indicando um comportamento dúctil no material cortado.

Rafatian *et al.* (2009) fizeram uma observação similar, porém com o ponto de vista da energia mecânica específica ( $\epsilon$ ), definida como a energia necessária para cortar um volume de rocha. A energia é computada a partir da relação entre a área embaixo da curva de Força vs. Deslocamento (que representa o trabalho mecânico exercido pelo cortador) e o volume de corte de rocha, como se mostra na Equação (2.14).

$$\epsilon = \frac{\text{Trabalho gasto no corte}}{\text{Volume de rocha cortado}} = \frac{\int(\text{Força})dx}{\text{Volume de corte}} \quad (2.14)$$

O incremento na energia específica ( $\epsilon$ ) está diretamente relacionado com o incremento nas forças de corte. A Figura 2.10 ilustra um exemplo de aumento de energia específica que está diretamente influenciada pelo aumento das pressões de confinamento.

Rafatian *et al.* (2009) e Kaitkay & Lei (2005) obtiveram semelhantes morfologias do material cortado em condições de confinamento. A presença de uma pressão de confinamento durante o processo de corte pode transformar o modo de fratura do material rochoso de frágil para dúctil. Enquanto o modo frágil é caracterizado por uma rocha cortada com fragmentos descontínuos, o modo de fratura dúctil se manifesta pela formação de lascas de rocha (Figura 2.4). Estas lascas também foram observadas nos experimentos de grande escala apresentados por Warren & Armagost (1988).

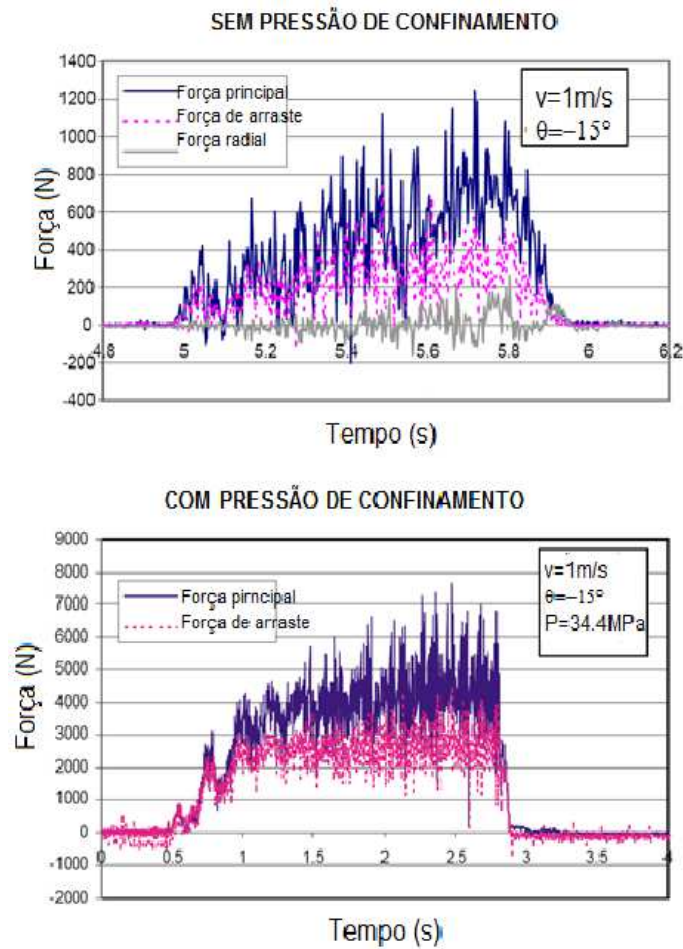


Figura 2.9 – Variação das forças de corte para ensaio de cortador único em diferentes condições de pressão de confinamento. (Modificado de Kaitkay & Lei, 2005).

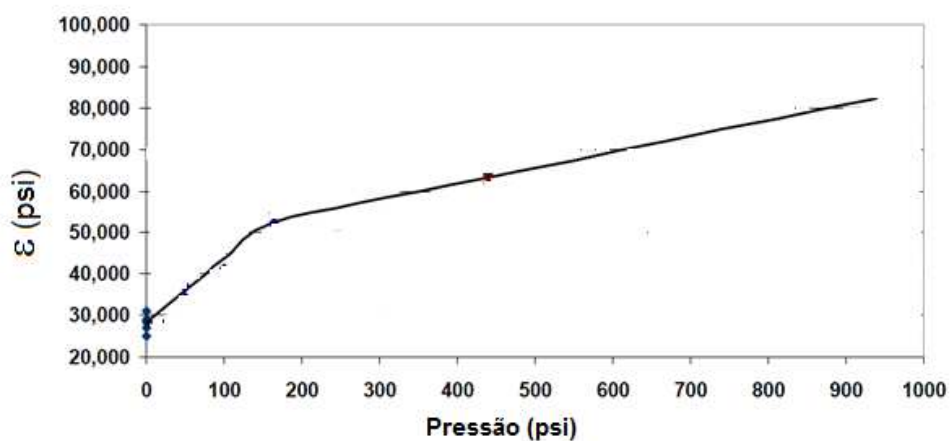


Figura 2.10 – Energia específica mecânica em função da pressão de confinamento para ensaios sobre mármore de Cartago. (Modificado de Rafatian *et al*, 2009).

Segundo Rafatian *et al* (2009) a morfologia das lascas se caracteriza por ter um lado plano e outro lado dentado (Figura 2.11). O lado plano da lasca é gerado porque os grãos mais próximos à face do cortador sofrem maiores deslocamento produzindo grandes quantidades de atrito que envolve a distorção dos grãos para uma forma plana.



Parte de atrás da lasca



Parte frontal da lasca

Figura 2.11 – Morfologia do material cortado com pressão de confinamento nos experimentos de Rafatian *et al.* (2009).

Em condições atmosféricas, a força necessária para cortar a rocha pode se aproximar da resistência à compressão não confinada da rocha, porque nessas condições é preciso apenas de uma força que supere a resistência de ligação existente entre os grãos que conformam a rocha. Detournay *et al.* (1995) correlacionaram a energia específica intrínseca com a resistência à compressão uniaxial de várias rochas (Quadro 2.1) e obtiveram uma boa correlação linear, como mostrado na Figura 2.12. Vale a pena ressaltar que o valor do intercepto é muito pequeno (-1.387 MPa) fazendo com que os dados experimentais indiquem uma aproximada proporcionalidade entre a energia específica intrínseca ( $\epsilon$ ) e a resistência à compressão uniaxial ( $q$ ).

Por outra parte, em condições de confinamento é gerada uma acumulação de material esmagado à frente do cortador. Neste empilhamento de material esmagado, embora as ligações entre os grãos sejam destruídas pela ação cisalhante do cortador, existe um efeito acumulativo das forças de atrito entre os grãos de material esmagado. Estas forças de atrito são as responsáveis pelo incremento na força necessária para o deslocamento do cortador.

Quadro 2.1 – Correlação entre a resistência a compressão uniaxial ( $q$ ) e a energia específica intrínseca ( $\epsilon$ ) de várias rochas. (Modificado de Detournay *et al*, 1995).

Rocha	$q$ (MPa)	$\epsilon$ (MPa)	$\epsilon/q$
Giz	17	13.2	0.78
A3-10 arenito	43	25.5	0.59
A2-6 arenito	18	20.59	1.14
A2-4 arenito	9	11.15	1.23
A2-3 arenito	20	14.2	0.71
A2-9 arenito	63	38	0.60
A2-7 arenito	46	32.3	0.70
Lf6 arenito	24	23	0.95
Lf7 arenito	28	27.3	0.98
Arenito Fontainebleau	178	160.3	0.90
Arenito Rhune	159	132.7	0.83
Arenito Vosges	42	32	0.76
Arenito Red Wildmoor	13	17.3	1.33
Calcário Buxy.	78	60.04	0.77

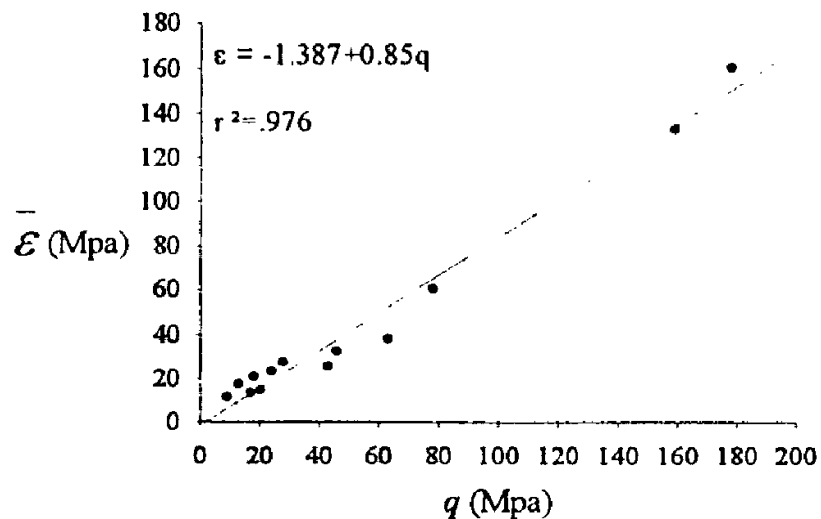


Figura 2.12 – Correlação entre a resistência a compressão uniaxial ( $q$ ) e a energia específica intrínseca ( $\epsilon$ ) de várias rochas. (Detournay *et al*, 1995).

Detournay & Tan (2002) afirmaram que a energia específica gasta por um cortador perfeitamente afiado, que se movimenta a velocidade constante e

remove material a profundidade constante, está relacionada linearmente com a pressão de confinamento através da Equação (2.15):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + mP_m \quad (2.15)$$

Onde,

$\varepsilon$  : Energia específica.

$\varepsilon_0$  : Energia específica gasta no corte em condições atmosféricas

$m$  : Coeficiente de variação da energia específica com a pressão de confinamento, definido pela Equação (2.16).

$P_m$  : Pressão de confinamento.

O coeficiente “ $m$ ” é definido pela Equação (2.16) como uma função do ângulo de inclinação do cortador ( $\theta$ ), do ângulo de atrito interno da rocha ( $\varphi$ ) e do ângulo de atrito na interface rocha/cortador ( $\psi$ ). Uma vez que o ângulo de atrito interno de muitas rochas tem valor dentro de um intervalo de 15° a 45°, espera-se que o coeficiente “ $m$ ” varie entre valores de 3 a 25 para cortadores inclinados a um ângulo  $\theta=15^\circ$  e para  $\psi=20^\circ$  (Detournay & Tan, 2002).

$$m = \frac{2\sin\varphi\cos(\theta + \psi)}{1 - \sin(\theta + \varphi + \psi)} \quad (2.16)$$

Onde,

$\theta$  : Ângulo de inclinação (ou de ataque) do cortador.

$\varphi$  : Ângulo de atrito interno da rocha.

$\psi$  : Ângulo de atrito na interface rocha/cortador.

O ângulo ( $\psi$ ) pode ser determinado através das medições das duas componentes da força de corte  $F_x$  (força horizontal) e  $F_y$  (força vertical), como é mostrado na Equação 2.17. Os experimentos em folhelhos feitos por Zijsling (1987) indicam que o valor de ( $\psi$ ) pode ser muito próximo de ( $\varphi$ ).

$$\psi = -\tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) - \theta \quad (2.17)$$

### 2.3.

#### Abordagem numérica da interação rocha-cortador

Nesta seção serão apresentados os resultados de algumas simulações numéricas da interação rocha-cortador para conhecer o estado da arte da aplicação de métodos numéricos na análise de processos tão complexos como o corte de rocha nas condições do ambiente de perfuração de poços de petróleo.

A interação rocha-cortador não é um processo simples porque as propriedades da rocha e os mecanismos de falha naturais ainda não são bem

entendidos. Para facilitar a compreensão deste comportamento, diversos pesquisadores têm desenvolvido modelos numéricos que têm permitido estudar mais detalhadamente as condições e parâmetros que afetam a interação rocha-cortador. A seguir, serão descritos os dois mecanismos de corte em rocha mais comuns na perfuração de poços de petróleo: corte por indentação e corte por cisalhamento. Ao mesmo tempo serão mostrados alguns modelos numéricos para representar estes mecanismos.

### 2.3.1. Corte da rocha por indentação

Diversos estudos experimentais mostram que durante o processo de indentação apresentam-se três zonas com diferentes comportamentos dentro da amostra de rocha, como mostrado na Figura 2.13. A primeira zona, localizada embaixo da ponta do indentedor é denominada zona de esmagamento. Nesta zona um pequeno volume de rocha é convertido num sistema de partículas cujo comportamento se assemelha ao comportamento dos solos. A segunda zona, denominada zona inelástica ou zona de fissuras, apresenta um estado de tensões predominantemente de tração, e a rigidez da rocha desta zona é a mesma da rocha intacta. A terceira zona é a zona elástica, onde independentemente de carga ou descarga por indentação as fissuras da rocha não crescem e não coalescem.

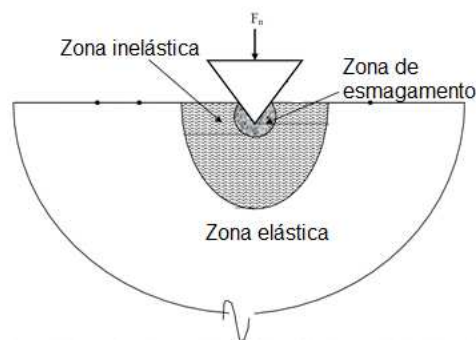


Figura 2.13 – Modelo de corte por indentação (Modificado de Abd Al-Jalil, 2006).

Esta representação do processo de indentação tem sido demonstrada experimental e numericamente. Liu *et al* (2004), usaram o código de elementos finitos R-T<sup>2D</sup> para simular o problema de indentação aplicando diferentes pressões de confinamento (5,10 e 20 MPa). A Figura 2.14 mostra o aumento da força de indentação quando o confinamento é incrementado.

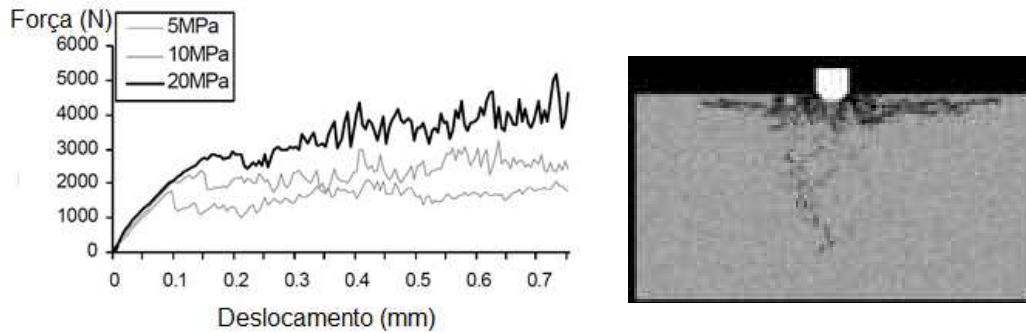


Figura 2.14 – Resultados de um processo de indentação em rocha para diferentes pressões de confinamento. (Modificado de Liu *et al*, 2002).

### 2.3.2. Corte de rocha por cisalhamento

As brocas de diamante artificial PDC têm ganhado grande popularidade nos processos de perfuração de poços de petróleo por manter altas taxas de penetração ao lado de uma maior vida útil. A ação cisalhante induzida pelos cortadores fixos tem mostrado maior eficiência para penetrar a rocha do que o efeito esmagador dos dentes das brocas tricônicas.

No entanto, o mecanismo de corte de rocha por cisalhamento tem sido modelado por poucos pesquisadores. Isto talvez porque o mecanismo de cisalhamento em rocha é mais complexo do que a simples indentação. Assim, entre os aspectos que diferenciam a dificuldade entre a modelagem do corte de rocha por cisalhamento e a modelagem por indentação podem-se mencionar:

- a) A carga aplicada na indentação é somente vertical, enquanto que no cisalhamento a carga pode ser tanto vertical quanto horizontal.
- b) A ferramenta para o processo de indentação pode ser modelada como uma forma axissimétrica, enquanto que para o cisalhamento não existe forma axissimétrica na ferramenta.
- c) Na modelagem de cisalhamento deve ser levada em conta a existência de interação entre o sistema de fissuras e a superfície livre.
- d) Na modelagem por cisalhamento, o processo de remoção do material cortado deve ser modelado de forma contínua.

Entre os trabalhos desenvolvidos na modelagem de corte em rocha por cisalhamento, pode-se citar o trabalho de Podgórski (2002) que mostra a influência do critério de falha na direção da propagação das fissuras em



materiais com comportamentos elásticos-frágeis. Podgórski aplicou vários modelos constitutivos, entre os quais, o modelo de Drucker-Prager para simular o corte em condições de tração e compressão, e concluiu que a formação de *chips* só se produz em condições de compressão (Figura 2.15). Por outra parte, este trabalho recomenda o uso de um procedimento denominado “supressão de elementos” para determinar a trajetória de propagação das fissuras no material. Este procedimento consiste em remover (um ou mais) elementos que atingem uma determinada deformação ou estado de tensões. Evidentemente, o valor da tensão ou deformação calculada para eliminar o elemento depende altamente do refinamento da malha de elementos finitos.

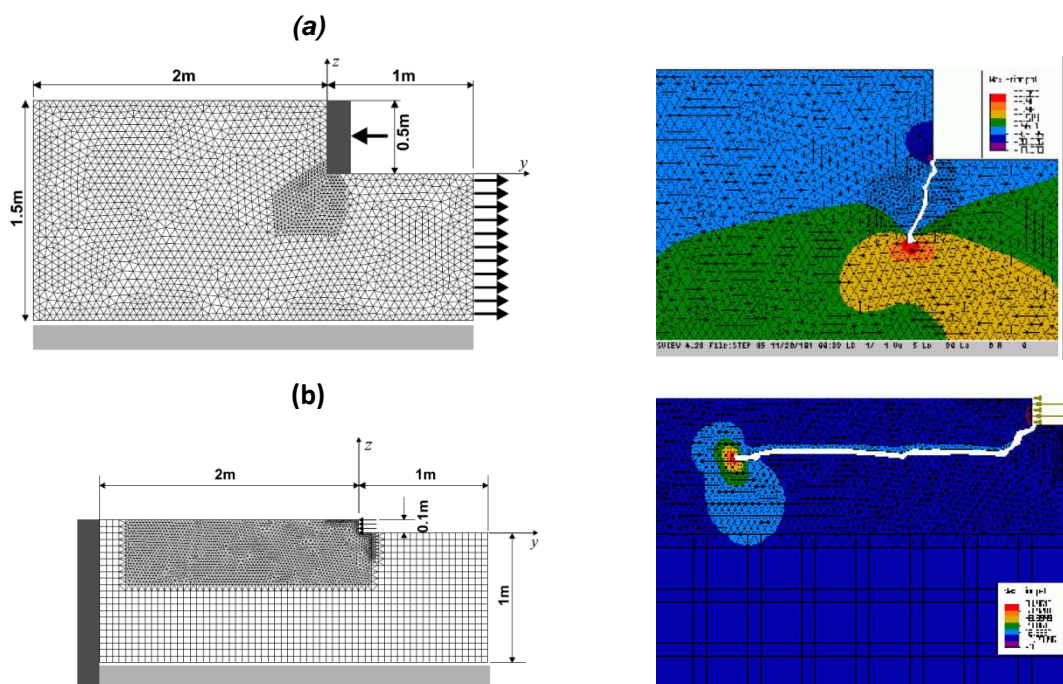


Figura 2.15 – Formação de fissuras usando o critério de Drucker-Prager: (a) Modelo de corte sob tração; (b) Modelo de corte sob compressão. (Modificado de Podgórski, 2002).

Jaime *et al* (2010) modelaram, através do código de elementos finitos LS-DYNA, as fases da fragmentação da rocha durante o corte, desde a iniciação da fissura, até a formação do chip e a interação rocha-cortador, obtendo resultados muito aproximados com as observações de laboratório (Figura 2.16). Este trabalho demonstra novamente que os resultados obtidos nas diferentes pesquisas são muito dependentes dos atributos da modelagem com elementos finitos, tais como o tipo e tamanho de elemento, formulação do contato e modelo

constitutivo do material. Finalmente, eles recomendaram o uso da formulação Lagrangeana para a modelação do processo de corte de rocha. Nesta formulação a malha se desloca junto com o material precisando técnicas de reconstrução de malha. Porém, esta formulação facilita a análise da interação rocha-cortador, pois evita que suas interfaces fiquem dentro de algum elemento da malha, como é o caso da formulação Euleriana, devido à malha permanecer fixa no espaço e o material ser movimentado através dela.

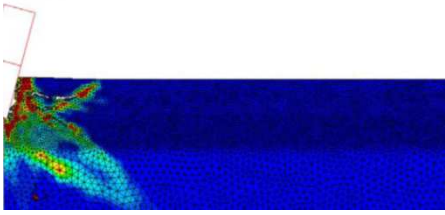

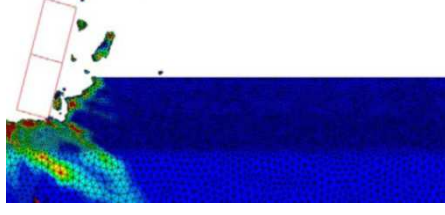

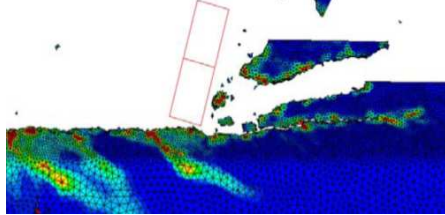

<b>Sequência de corte na simulação com elementos finitos</b>	<b>Resultados de laboratório</b>
	
<p>Enquanto o material é comprimido horizontalmente surgem fissuras superficiais.</p>	
	
<p>Pequenos fragmentos na frente do cortador se desprendem em forma de lascas e o cortador perde contato com o material causando quedas no registro das forças.</p>	
	
<p>Os grandes fragmentos que resultam da falha por cisalhamento são empurrados na frente o cortador.</p>	

Figura 2.16 – Comparação entre resultados numéricos e observações experimentais de corte em rocha. (Modificado de Jaime *et al*, 2010).

Modelos mais recentes, como o apresentado por Zhou *et al* (2011), descrevem simulações tridimensionais de corte de rocha com elementos finitos. Especificamente este trabalho demonstrou que as forças requeridas para cortar um volume de rocha (energia específica mecânica) diminuem quando a profundidade de corte é incrementada (Figura 2.17).

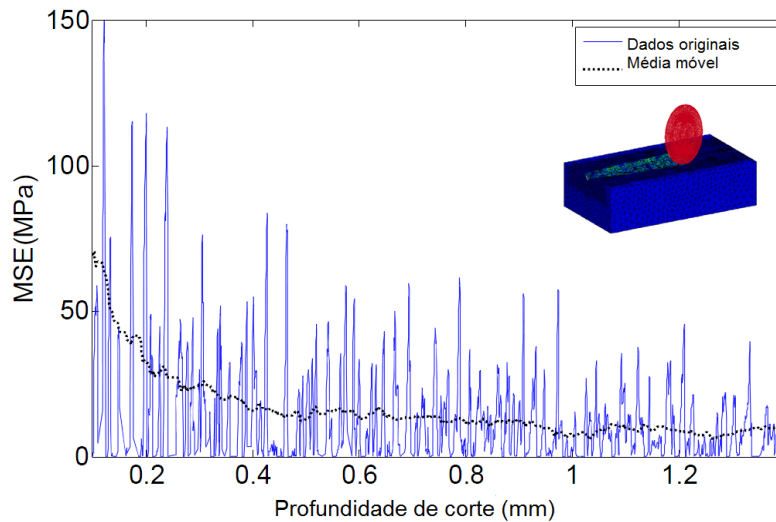


Figura 2.17 – Evolução da energia específica com a profundidade de corte. (Modificado de Zhou *et al*, 2011).

Embora as simulações anteriores tenham abordado o comportamento da rocha como um material frágil, estudos experimentais têm demonstrado que a presença de pressão hidrostática externa, como a exercida pelo fluido de perfuração, pode transformar o comportamento rochoso frágil para um comportamento dúctil (Kaitkay & Lei, 2005). Isso mostra que as modelagens encontradas até o momento na literatura não tem levado em conta o comportamento plástico que pode apresentar o material rochoso sob as condições encontradas no fundo de um poço de exploração petroléira.